

# Fortschritte auf dem Gebiet der Strömungsakustik

Crighton, David G.

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1995 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.171-177



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

DAVID G. CRIGHTON, Cambridge

## **Fortschritte auf dem Gebiet der Strömungsakustik**

Die theoretische Strömungsakustik, Aero- und Hydroakustik einschließend, wurde 1952 mit einer einzigen Veröffentlichung von Sir James Lighthill, dem Preisträger der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille im Jahre 1975, aus der Taufe gehoben. Diese Veröffentlichung, so bahnbrechend, daß sie keinen einzigen Literaturverweis enthält oder benötigt, bestimmte die Methoden der Strömungsakustik, und diese Methoden sind nach mehr als vierzig Jahren und einigen Tausenden von Veröffentlichungen weiterhin gültig. Es war mein großes Glück, vor fast dreißig Jahren als Doktorand von Professor J.E. Ffowes Williams in die Welt der theoretischen Aeroakustik eingeführt zu werden, in einer Zeit, die besonders fruchtbar für die Entwicklung der Strömungsakustik war, und die wichtige Anwendungen dieser Theorie sah. Seitdem hat das Tempo des Fortschritts in der Strömungsakustik merklich nachgelassen; der Triebwerkslärm von Düsenflugzeugen mit Unterschallgeschwindigkeit wurde zwischen 1960 und 1980 stark reduziert, und sogar die Concorde wurde „leise“ genug, um vor 20 Jahren im Einklang mit den damaligen Vorschriften in Dienst genommen werden zu können. Nach solchen Erfolgen ist die Entwicklung von Theorie und Technologie seither eher in kleinen Schritten als in bahnbrechenden Sprüngen vorangegangen. Wichtige Herausforderungen stellen sich jedoch auch jetzt: Wie gewinnen wir das notwendige Wissen, und wie läßt es sich in sichere und preiswerte Technologie übertragen, die geeignet ist, den abgestrahlten Schall von Propfan-Triebwerken, von Überschallflugzeugen der zweiten Generation oder von sehr großen Flugzeugen mit 800 oder mehr Fluggästen, unter Kontrolle zu bringen? Diese und andere Fragen, zusammen mit der allgemeinen Verschärfung der Schallschutzverordnungen, werden der Aeroakustik eine bedeutende Rolle in der Zukunft garantieren.

Um zu verstehen, warum die Lärmbekämpfung bei Flugmotoren so schwierig ist, muß man sich vergegenwärtigen, welchen Lautstärken- und Frequenzumfang das menschliche Ohr aufzunehmen fähig ist, und sich zudem das Verhältnis von abgestrahlter Schalleistung zu Triebwerksleistung vor Augen halten. Die Größenverhältnisse, die hier auftreten, findet man sonst nur in der Astro- oder Quantenphysik. So liegen zum Beispiel der Schalldruck, der der Hörschwelle entspricht (0 dB), und der Schalldruck, der der Schmerzschwelle entspricht (140 dB), 14 Zehnerpotenzen auseinander. Doch ein Schallpegel von 160 dB, der dauerhafte Hörschäden verursachen würde, entspricht Druckschwankungen von weniger als einem Millibar und daher einer vernachlässigbaren mechanischen Energie. Der Anteil der mechanischen Energie eines Strahltriebwerkes, der in Schall umgesetzt wird, ist sehr klein und kann folgendermaßen veranschaulicht werden: Die Lautstärke eines der älteren Düsenflugzeuge, einer Boeing 707 etwa, ist vergleichbar mit der Lautstärke, die 10 Milliarden Menschen, also die gesamte Weltbevölkerung, im Chor rufend hervorbringen. Heute sind diese älteren Flugzeuge durch neue ersetzt worden (z.B. Boeing 767, Airbus A310), die die doppelte Zahl an Passagieren über größere Entfernungen transportieren und Triebwerke mit der vierfachen Leistung verwenden. Die Lautstärke eines modernen Flugzeuges entspricht hinge-

gen der Lautstärke von nur 10 Millionen rufenden Menschen, also der Bevölkerung einer Metropole.

Die Annahme, daß die Lärminderung um 30 dB eine automatische Folge der verbesserten Aerodynamik des Flugzeuges und des höheren Wirkungsgrades der Triebwerke ist, wäre jedoch ganz falsch. Der akustische und der mechanische Wirkungsgrad haben fast nichts miteinander zu tun: Die gesamte während eines Flugzeugstarts abgestrahlte Schallenergie würde gerade ausreichen, um ein einziges Ei zu kochen! Die wissenschaftliche und technologische Herausforderung an die Strömungsakustik ist darin begründet, daß eine Lärminderung um einen Faktor Tausend verlangt wird, ohne daß Leistungseinbußen oder Gewichtserhöhungen in Kauf genommen werden dürfen.

Unter dem Schall leidet nicht eine Maschine oder ein Mikrophon, sondern der Mensch, dessen Gehörsinn im Bereich von 2 bis 4 kHz am empfindlichsten ist (und dabei diskrete Töne als am störendsten empfindet). Der überwiegende Teil der Energie des Flugzeugschalls hingegen liegt bei tieferen Frequenzen, typischerweise zwischen 200 und 400 Hz. Um den subjektiv empfundenen Lärm zu mindern, bedarf es Maßnahmen, die in einen Frequenzbereich eingreifen, der verhältnismäßig wenig Energie enthält. Die geeignete Maßnahme zu finden, ist die eigentliche Schwierigkeit. Man hat modifizierte Turbinenauslässe konstruiert, die zwar den Gesamtschallpegel mindern, dabei allerdings bedauerlicherweise den an sich schwachen aber gut hörbaren Schall erhöhen, so daß der gesetzlich vorgeschriebene Wert überschritten wird. Andere Maßnahmen reduzieren zwar den Schall in den für die Bewertung entscheidenden Frequenzen, führen aber zu Leistungsverlusten. Werden diese Leistungsverluste z. B. durch eine Erhöhung der Turbinenauslaßgeschwindigkeit kompensiert, so führt dies wiederum zu einem Anstieg des Schallpegels, unter Umständen bis auf ein Niveau, das über dem ursprünglichen liegt! Andere Neuerungen erhöhen das Gewicht des Flugzeugs über Gebühr oder bestehen zwar die Prüfung am Boden, versagen aber unter realistischen Flugbedingungen.

Zusammenfassend: Die Behandlung des strömungsakustischen Problems muß der Kostenseite Rechnung tragen und überdies die Subjektivität des Höreindrucks berücksichtigen. Es genügt nicht, ein isoliertes Triebwerk oder gar ein Modell in einem Versuchsstand zu analysieren. Es geht vielmehr um den Schall, wie er im Flugzeug oder außerhalb des Flugzeugs im routinemäßigen Einsatz wahrgenommen wird. Außerdem ist man sich seit einiger Zeit bewußt, daß im Landeanflug, bei dem die Triebwerke bei niedriger Last gefahren werden und man daher einen niedrigen Schallpegel erwarten würde, die Umströmung unentbehrlicher Teile des Flugzeuges wie z. B. Fahrgestell und Landeklappen, Schallpegel in der Größenordnung des Triebwerkslärms erzeugt.

Im Lichte dieser Vorbetrachtungen, welche Rolle kann mathematische Theorie einnehmen? Es ist klar, daß wir keine präzisen Vorhersagen von Absolutwerten erwarten können, es sei denn, es handelt sich um sehr einfache Strömungsvorgänge, weit einfacher als die turbulente Strömung eines Freistrahls bei realistischen Geschwindigkeiten. Selbst mit enormer Rechnerkapazität ist es unmöglich, die turbulente Strömung mit solcher Genauigkeit zu berechnen, daß man über diejenigen winzigen Details, die das Schallfeld bestimmen, Aussagen treffen kann. Solche Rechnungen durchführen zu können, ist die Hoffnung und das Bestreben einer neuen Disziplin innerhalb der Akustik, der

„numerischen Strömungsakustik“ („computational aeroacoustics“), die sich sowohl mit grundlegenden theoretischen Fragen auseinandersetzt als auch anwendungsorientierte Probleme zu lösen versucht. Bislang ist es nur gelungen, für sehr einfache instationäre Strömungen, die durch eine Wirbellinie oder zwei Ringwirbel erzeugt werden, gleichzeitig das Strömungsfeld und das Schallfeld zu berechnen, doch es ist sehr unwahrscheinlich, daß vollturbulente Fälle in hinreichend kurzer Zeit folgen werden.

Statt absoluter Vorhersagen muß man von der theoretischen Strömungsakustik die Aufklärung der schallerzeugenden Mechanismen, Ähnlichkeitsgesetze und Prinzipien, mit denen man experimentelle Ergebnisse auf einfache Gesetzmäßigkeiten zurückführen kann, verlangen. Weiterhin darf man Vorschläge für wegweisende Experimente und für Lärmbekämpfungsstrategien erwarten. Diesen Erwartungen wurde die Strömungsakustik bereits in ihren Anfängen gerecht: Lighthills Pionierarbeit, in der den exakten strömungsmechanischen Gleichungen die Form einer inhomogenen Wellengleichung aufgezungen wurde, erfaßte den Schall des turbulenten Freistrahls. Jede Abweichung von den Gesetzmäßigkeiten einfacher Ausbreitung von Schallwellen kleiner Amplitude in einem homogenen Medium erscheint als Quellterm, womit die Auswirkungen von turbulenten Strömungen, von Stößen und von Gradienten sowohl der mittleren Strömungsgeschwindigkeit als auch der Temperatur – wie viele andere Effekte im Lighthillschen strömungsakustischen Spannungstensor  $T_{ij}(\mathbf{x}, t)$  verborgen – abgedeckt werden.

Die Vorgehensweise in der theoretischen Strömungsakustik läuft nach dem folgenden Programm ab: Erstens, isoliere für den untersuchten schallerzeugenden Vorgang in der transparentesten Weise den relevanten Teil von  $T_{ij}$ ! Dazu mag es nötig sein, modellbildende Annahmen zu treffen und die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie unter Berücksichtigung des chemischen Gleichgewichts heranzuziehen. Zweitens, bestimme eine Greensche Funktion für die Wellengleichung und die jeweiligen Randbedingungen! (Zum Beispiel könnte der Verbrennungsvorgang in einem runden Kanal mit offenem Ende vonstatten gehen. Ebenso könnten die turbulenten Mischungsvorgänge in freier Atmosphäre oder nahe einer Oberfläche, z. B. einer Tragfläche, ablaufen.) Dieser Schritt ist mathematischer Natur und hat zu zahlreichen mathematischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Fourier-transformierten und der asymptotischen Methoden geführt. Drittens, berechne die Faltung der Quelle und der Greenschen Funktion, um die signifikanten Eigenschaften des Schallfeldes mit Hilfe der einfachsten aber hinreichend genauen Beschreibung der Quelle bloßzulegen, leite die Ähnlichkeitsgesetze ab, korreliere Vorhersagen mit den Ergebnissen aus Experiment und numerischer Simulation, und leite daraus Maßnahmen der Schallreduzierung ab!

Dieser dreistufigen Vorgehensweise folgten schon Lighthills ursprüngliche Veröffentlichung und die darauf aufbauenden Arbeiten. Entscheidend war der erste Schritt, in dem der Quadrupolcharakter der Quellen im turbulenten Freistrahle erkannt wurde. Somit war klar, daß diese Quellen – wie stets wenn die turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen klein sind gegenüber der Schallgeschwindigkeit – einen niedrigen akustischen Wirkungsgrad aufweisen.

Der zweite Schritt ist in diesem Fall trivial, der dritte Schritt hingegen alles andere als trivial. Trotz jahrzehntelanger Forschung auf dem Gebiet der turbulenten Strömungen

weiß man sehr wenig über den Lighthillschen strömungsakustischen Spannungstensor  $T_{ij}$ . Nicht eine seiner Komponenten ist bislang im Experiment gemessen worden. Da detaillierte Informationen über diesen Tensor auf Dauer fehlen werden, schloß Lighthill, daß man explizit den strengen Quadrupolcharakter der Quelle aufdecken muß.

Dies ist um so wichtiger, als Quelltypen höheren akustischen Wirkungsgrades, Monopole und Dipole, die der Erzeugung von Volumen und Impuls entsprechen, nicht vorkommen dürfen. Diese Überlegungen führten zum gefeierten und inzwischen allseits bekannten  $U^8$  Gesetz für die abgestrahlte Schalleistung  $P$ . ( $U$  ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Strahls.) Die Schalleistung ist proportional zum Produkt aus der Dichte, dem Quadrat des Strahldurchmessers und  $U^8$  geteilt durch die Schallgeschwindigkeit hoch fünf. Gemäß Theorie deckt dieses Gesetz den relevanten Geschwindigkeitsbereich, mit Ausnahme sehr hoher Geschwindigkeiten, ab. Aus dem  $U^8$  Gesetz folgt, daß nur ein sehr geringer Teil der Energie der Strömung in Schallenergie umgesetzt wird, und dies ist experimentell bestätigt worden.

Zum ersten Schritt der Lighthillschen Vorgehensweise, der Identifikation des schallerzeugenden Mechanismus, noch zwei Anmerkungen: Erstens triumphierte hier die Theorie über das Experiment. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung, 1952, und auch in den folgenden Jahren wurden experimentelle Arbeiten vorgestellt, deren Ergebnisse zu Ähnlichkeitsgesetzen mit niedrigeren Exponenten führten, Gesetze mit  $U^4$  bis  $U^6$ . Nach der Veröffentlichung von Lighthills  $U^8$ -Gesetz wurde rasch erkannt, daß in den experimentellen Studien nicht nur der von der turbulenten Strömung erzeugte Schall gemessen wurde sondern auch der Schall, der von der instationären Ausströmung aus der Turbine erzeugt wird. Diese zusätzliche Schallquelle hat Dipol- oder gar Monopolcharakter. Nachfolgende Experimente, in denen der am Turbinenauslaß hervorgerufene Schall eliminiert wurde, entsprachen dem  $U^8$  Gesetz mit erstaunlicher Genauigkeit.

Die zweite Anmerkung betrifft die Konsequenzen des Ähnlichkeitsgesetzes für die Praxis. Herkömmliche Triebwerke mit hoher Strömungsgeschwindigkeit  $U$  und kleinem Durchmesser  $D$  wurden durch Triebwerke mit kleinerer Strömungsgeschwindigkeit  $U$  und größerem Durchmesser  $D$  ersetzt. Verkleinert man z. B.  $U$  um einen Faktor zwei und erhöht  $D$  um einen Faktor zwei hoch drei Halbe, so bleibt die Triebwerksleistung unverändert, während die Schalleistung um einen Faktor  $2^5$ , gleichbedeutend mit 15 dB, sinkt. Überdies wirkt sich diese Maßnahme vorteilig auf das Schallspektrum aus, indem die lauteste Frequenz in den tieferen Teil des Spektrums verschoben wird und somit als weniger lästig empfunden wird. Auf den Gehörsinn und damit auf den nach den gesetzlichen Normen berechneten Schallpegel bezogen, übertrifft die Schallpegelminderung 15 dB bei weitem.

Eine ähnliche Vorgehensweise, zu deren Entwicklung ich selbst beigetragen habe, ist auf andere schallerzeugende Mechanismen angewandt worden. Erwähnt seien sowohl aeroakustische Schallquellen, die mit den Wechselwirkungen von Stößen und Turbulenz, mit dem Verbrennungsvorgang, und mit der Wechselwirkung des Triebwerkstrahls und Teilen der Flügel zusammenhängen, als auch hydroakustische Schallquellen. In der Hydroakustik ist es besonders wichtig, mittels geeigneter Modellbildung die korrekte Multipolstruktur der Quelle zu erkennen, da in Wasser die Machzahl, das Verhältnis von mittle-

rer Strömungsgeschwindigkeit und Schallgeschwindigkeit, typischerweise sehr klein ist,  $10^{-3}$  zum Beispiel. Eine scheinbar harmlose Vereinfachung in der Modellbildung kann ohne weiteres zu einer zusätzlichen Quelle mit zwar geringer Stärke aber hohem akustischen Wirkungsgrad führen, die die eigentlich vorgesehenen Quellen übertönt. Diese Anmerkung gilt besonders der „numerischen Strömungsakustik“, da numerische Verfahren zahlreiche Vereinfachungen erfordern. Die besonderen Schwierigkeiten, denen man in der theoretischen Strömungsakustik ausgesetzt ist, lassen sich folgendermaßen ausdrücken: „Fehler und Vereinfachungen müssen nicht nur klein sein, sondern unhörbar!“

Zuvor erwähnte ich die Wechselwirkung, im Landeanflug, von Turbulenz mit dem Fahrgestell und den Kanten der Flugzeugklappen. Die Schallfelder, die sich aus diesen Wechselwirkungen ergeben, weisen ungewöhnliche Eigenschaften auf, Eigenschaften, derer man zuerst mit theoretischen Methoden gewahr wurde, die man inzwischen aber auch in der industriellen Praxis in numerischen Ansätzen berücksichtigt. Die Wechselwirkung von turbulenter Strömung und der *hinteren* Kante der Tragfläche erzeugt ein Schallfeld, das am stärksten ist *vor* dem Flugzeug, und man muß damit rechnen, daß dieser Schallfeldtyp bei den noch größeren Flugzeugen der Zukunft an Bedeutung gewinnen wird.

Elegante experimentelle Untersuchungen dieser Wechselwirkungsphänomene durch Professor T. Kambe an der Tokioer Universität führten zur eindeutigen Bestätigung der Lighthillschen Theorie. Kambe führte sehr sorgfältig kontrollierte Experimente durch, in denen Ringwirbel miteinander, mit der Kante einer schmalen Platte, mit der Kante einer breiten Platte und mit einem Loch in einer Platte in Wechselwirkung gebracht wurden. Für solche idealisierte Fälle kann die Lighthillsche Wellengleichung vollständig gelöst werden. Kambe fand vollkommene Übereinstimmung von Theorie und Experiment. In jüngster Zeit sind in der direkten numerischen Simulation solcher einfachen aber dennoch technisch relevanten Wechselwirkungsphänomene ebenfalls große Fortschritte erzielt worden.

Die Strömungsakustik ist reich an interessanten Effekten mit großer Wirkung und kleiner Ursache. Vielleicht darf ich hier kurz auf einen Teil meiner Doktorarbeit eingehen, auf die Wirkung von Gasblasen in einer turbulenten Flüssigkeit (z. B. im Nachlauf eines Schiffes oder in den Grenzschichten am Rumpf) auf den Schall gemessen in der blasenfreien Umgebung. Entscheidend ist die Kompressibilität des Zwei-Phasengemisches (Luft, Wasser) ausgedrückt in der Schallgeschwindigkeit. Für sehr niedrige Konzentrationen an Blasen, ein Promill etwa, ist die Schallgeschwindigkeit rund 100 Meter pro Sekunde und damit nur ein Zehntel der Schallgeschwindigkeit in blasenfreiem Wasser (und auch nur ein Drittel der Schallgeschwindigkeit in Luft). Dieser erstaunlich große Unterschied hat bedeutende Auswirkungen auf den von der Turbulenz hervorgebrachten Schall. Es gelang mir zu zeigen, daß die von der Turbulenz ausgehende Schalleistung in der blasenbehafteten Strömung den Wert für die blasenfreie Strömung bei weitem übertrifft, und zwar schätzungsweise um das Hunderttausendfache bei einer Blasenkonzentration von einem Promill.

An dieser Stelle möchte ich gerne eine Entwicklung in der Strömungsakustik erwähnen, die mich in den letzten zehn Jahren stets interessiert hat. Es handelt sich um die

mögliche Einführung von „Propfans“, moderne Hochgeschwindigkeitspropeller, im Luftverkehr. Bedeutende Treibstoffeinsparungen, von 20 bis 50 %, werden prognostiziert, besonders wenn zwei dicht benachbarte, gegenläufige Propfans verwendet werden. Allerdings ist es bislang nicht klar, ob die Schallpegel auf die im nächsten Jahrtausend zu erwartenden gesetzlichen Grenzwerte abgesenkt werden können. Die Berechnung des Schallfeldes für zwei gegenläufige Propeller bei großem Schub ist gespickt mit Schwierigkeiten. Das Spektrum weist zum einen zahlreiche tonale Maxima auf, deren Amplituden von einer Vielzahl von geometrischen und aerodynamischen Parametern abhängen, und zum anderen Breitbandgeräusch, das mit stochastisch verteilten Schwankungen in der Zuströmung zusammenhängt.

Die Berechnung der Amplitude und der Richtcharakteristik für einen jeden dieser zahllosen Töne als Funktion aller Parameter ist kaum möglich. Ich selbst bin dieses Problem systematisch mit Hilfe asymptotischer Verfahren angegangen, unter der Annahme, daß die Zahl von Propellerblättern recht groß ist. Im Fall der getesteten Prototypen liegt diese Zahl bei 8 bis 16, hinreichend groß für das Rechenverfahren. Die theoretische Behandlung benötigt nur genaue Angaben über die Geometrie des einzelnen Propellerblattes (das gebogen, verdreht und geschrägt ist) und die stationäre Druckverteilung auf der Propellerblattoberfläche. Die Verteilung der starken, instationären Schallquellen hervorgerufen durch die Wirkung der beiden Propeller aufeinander wird ebenfalls unter der Annahme einer großen Propellerblattzahl analytisch berechnet, also ohne Computer. Schließlich wird unter derselben Annahme, und noch immer ohne Computer, das Schallfeld bestimmt.

Das Ergebnis ist eine Formel für die Intensität und die Richtcharakteristik für die Hunderte von Tönen im hörbaren Frequenzbereich in Abhängigkeit aller Parameter. Für gegebene Werte der Parameter können die Amplituden aller Töne mit geringem Aufwand berechnet werden (mit einem Taschenrechner). Überdies erlaubt das Verfahren, Information über den für jeden Ton verantwortlichen Wechselwirkungsmechanismus zu extrahieren (also die Quelle jedes Tones zu identifizieren), womit man dann abschätzen kann, ob Maßnahmen zu seiner Eindämmung getroffen werden können. Überraschend gute Übereinstimmung von Theorie und Experiment wurde für ein Flugzeug des Typs Fairey Gannet erzielt. In der Folge wurde ein Patent für den optimalen Schrägwinkel des Propellerblattes erteilt. Seit Jahren ist diese Theorie, als Computer-Programm implementiert, bei Rolls-Royce im täglichen Einsatz, was wiederum zu steter Erweiterung und Verfeinerung der Theorie geführt hat. Dies stellt für mich das befriedigendste und erfolgreichste Stück angewandter Mathematik dar, an dem ich bislang beteiligt war.

Zusammenfassend, sehr geehrter Herr Präsident, möchte ich sagen, daß ich weiterhin die Strömungsakustik für das ideale Anwendungsgebiet für die angewandte Mathematik britischen Stils halte. In der Strömungsakustik benötigt man die Fähigkeit zur konstruktiven Modellbildung, physikalischen Spürsinn und eine reiche Palette von analytischen Methoden, um zu tiefergehendem Verständnis zu gelangen, um die wichtigen Prinzipien zu erkennen, und um Nutzen aus experimentellen Ergebnissen zu ziehen. Die Aufgabenstellungen in der Strömungsakustik berühren die Grundfragen der Mechanik, sie sind komplex und subtil zugleich. Die vollständige numerische Berechnung realistischer Fäl-

le liegt weiterhin in der Ferne. Und experimentelle Methoden sind häufig den gleichen Schwierigkeiten ausgesetzt wie numerische Methoden. Analytische Methoden sind, meiner Meinung nach, daher weiterhin unersetzlich.

Trotz des enormen Fortschritts, den wir in den 43 Jahren seit Lighthills Grundsteinlegung sowohl in der Wissenschaft als auch in der Technik gesehen haben, verbleiben zahlreiche herausfordernde Aufgaben, in deren Lösung die angewandte Mathematik weiterhin eine Schlüsselrolle einnehmen wird.